

大口径激波管中降低雷诺数的方法

林建民 李仲发 俞鸿儒 李振华

(中国科学院力学研究所)

摘要 提供了一种在大口径激波管中降低2区气流雷诺数的方法。采用该方法雷诺数可由通常的 $10^6 \sim 10^7$ 量级降至 10^5 量级。实验结果表明采用此方法后2区流场未受明显扰动。给出了驱动压比 P_{41} 与主激波马赫数 M_{s1} 间关系式并由实验加以验证。

关键词 激波; 激波管

1 前言

激波管作为气动研究的主要手段之一, 在50年代即已广泛采用, 至今仍起着重要作用。在激波管中进行模型实验一般希望被驱动段截面积大些, 以便消除模型过小带来的不便。从流动方面考虑, 具有较大内径的激波管中2区实验气流受管壁边界层影响比小口径激波管时小许多。这里所谓的大口径激波管指被驱动段内径 $D \geq 100$ mm。以水力直径为特征长度的2区实验气流雷诺数 $Re_D = \rho_2 u_2 D / \mu_2$ 一般在 10^6 量级。

有些实验希望在 Re_D 较低条件下进行, 即要求调整实验状态降低 Re_D 值。经常采用的方法有: (1)降低驱动压比 P_{41} , 减弱激波强度 M_s 和 u_2 , 以降低 Re_D , (2)降低被驱动段初始压强 P_1 和密度 ρ_1 调整 Re_D 。两种方法均能在一定范围内调整实验气流雷诺数, 但由于两种方法有时是相互制约的(如降低 P_1 相当于提高驱动压比 P_{41})。因此调整的效果不很明显。在降低初始压强的基础上, 降低驱动压比不失为一种良策, 但将遇到不得不使用超薄膜片的问题。薄膜片不仅实验重复性差, 且易破碎。破碎膜片将引起2区流场扰动, 影响实验气流品质, 甚至造成碎膜损坏实验模型和传感器的严重后果。本文目的在于提供一种既能较大幅度地降低雷诺数 Re_D , 又能避免以上问题发生的实验方法。

2 实验方法及流动分析

在大口径激波管中降低雷诺数 Re_D , 实质上是要调整出在驱动压强 P_4 不太低(不使

本文于1990年5月22日收到, 8月3日收到修改稿。

用超薄膜片)的条件下,降低被驱动段初始参数 D_1 、 ρ_1 时不至使激波马赫数 M_s 增加过快(ρ_2 、 u_2 缓慢增加)的实验状态。扩张激波管实验结果表明^[1~3],被驱动段截面积大于驱动段截面积时,在具有相同驱动压比条件下扩张激波管中可获得比等截面激波管低得多的激波马赫数。文献[2]指出,为进一步获得极弱激波,可以在驱动段与被驱动段之间插入一收缩~扩张喷管。但在业已投入运行的激波管中,增加多种口径的驱动段或增加不同喉道直径的收缩~扩张喷管,都将带来加工和操作上的诸多不便。本文实验中采用了在夹膜处增设不同开孔面积孔板的方法来调整激波强度、降低实验气流 Re_D (见图 1)。

由图 1 可以看出,破膜后 4 区高压气体经中心稀疏波加速后由孔板流出。孔口处为声速流,孔口面积用 A^* 表示。气流在孔口处经定常膨胀、加速后流入被驱动段。为分析方便,假定孔板前后为收缩~扩张“喷管”流,“喷管”入口为驱动段截面积 A_4 ,出口为被驱动段面积 A_1 。如进一步假定除激波外流动是无粘的,气体为完全气体,则孔板前后可按等熵流处理,若“喷管”出口为过膨胀流, A_1 区气流经左行二次激波调整后与 3 区流动耦合^[3]。主激波后 2 区流动由主激波马赫数 M_{s1} 确定并由分界面条件与 3 区衔接。

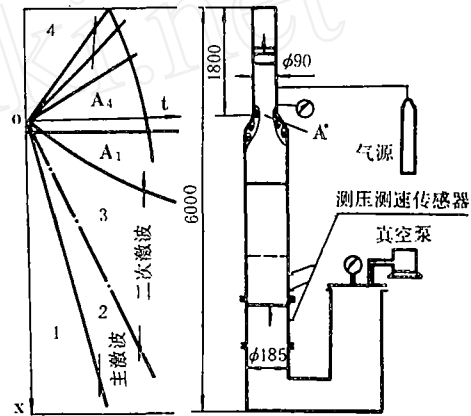


图 1 增设孔板后波图和流动示意图

流动中 4 区与 A_1 区压比、声速比满足以下关系:

$$\frac{P_4}{P_{A1}} = \left(\frac{a_4}{a_{A1}} \right)^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}} = \left[\left(1 + \frac{\gamma_4-1}{2} M_{A4}^2 \right) \left(\frac{1 + \frac{\gamma_4-1}{2} M_{A1}^2}{1 + \frac{\gamma_4-1}{2} M_{A4}^2} \right)^{1/2} \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}} \quad (1)$$

其中 A_1 , A_4 截面处气流马赫数 M_{A1} , M_{A4} 按等熵流规律由面积比 A_1/A^* , A_4/A^* ^[4] 确定。二次激波为左行波,激波马赫数由下式确定:

$$G = \frac{\gamma_4+1}{4} \left[M_{A1} - \left(\frac{u_2}{a_1} \right) \left(\frac{a_1}{a_4} \right) \left(\frac{a_4}{a_{A1}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{2}{\gamma_1+1} \left(M_{s1} - \frac{1}{M_{s1}} \right) \quad (3)$$

$$M_{s2} = G + (G^2 + 1)^{1/2} \quad (4)$$

以上式中 a_1 为 1 区初始声速, γ_1 , γ_4 分别为 1, 4 区绝热指数。最后驱动压比可以写为:

$$P_{A1} = \frac{P_4}{P_{A1}} \left[1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1+1} (M_{s1}^2 - 1) \right] \left[1 + \frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1} (M_{s2}^2 - 1) \right]^{-1} \quad (5)$$

由公式(1)~(5)可以看出,当给定激波管驱动压比后主激波马赫数 M_{s1} 取决于 M_{A4} ,

M_{s1} , 而它们的值又依赖于面积比 A_4/A^* 和 A_1/A^* 。因此, 通过改变孔板开孔面积 A^* 可以达到调整 2 区流动参数和 Re_D 的目的。应当指出若激波管驱动压比很低, 二次激波将变为位于“喷管”内的驻激波的计算公式应相应改变(为避免繁琐略去了计算公式)。

3 实验结果

本文实验在扩张激波管中进行, 主要几何尺寸见图 1。实验中选用的孔板开孔直径分别为 42mm, 31.5mm, 21.4mm 和 11.5mm, 相应的面积比 A_1/A^* 分别为 13.624, 24.213, 52.356 和 181.818。孔板开口处用圆弧过渡。扩张激波管 ($A_4 = A^*$) $A_1/A^* = 2.966$ 。为便于比较, 膜片均选用 0.5mm 厚的纯铝膜片(不掉膜)。驱动压比 P_{41} 通过调整被驱动段初始压强 P_1 控制, 变化范围在 $P_{41} = 13.5 \sim 158.219$ 之间。实验中主激波速度由安装在实验段附近管壁同母线上的测速传感器测得。2 区实验气流压强由实验段处压力传感器监测。

三种驱动压比条件下, 改变孔板开孔面积比 A_1/A^* 时观察到的主激波马赫数 M_{s1} 曲线绘于图 2。

图 2 中诸曲线表明夹膜处插入孔板后, 相同驱动压比条件下主激波马赫数明显低于扩张激波管 ($A_1/A^* = 2.966$) 时 M_{s1} 值, 且随着 A_1/A^* 值的增加 M_{s1} 单调下降。实验结果还表明, 增设孔板起到了在不同 P_{41} 时减弱主激波强度进而降低 2 区实验气流 $\rho_2 u_2$ 值的作用。

上述实验条件下获得的激波管 2 区气流雷诺数随面积比 A_1/A^* 变化曲线绘于图 3。为便于比较, 图 3 中还给出等截面激波管 ($A_1/A^* = 1, D_1 = D_4 = 185\text{mm}$) 的 Re_D 数计算值。

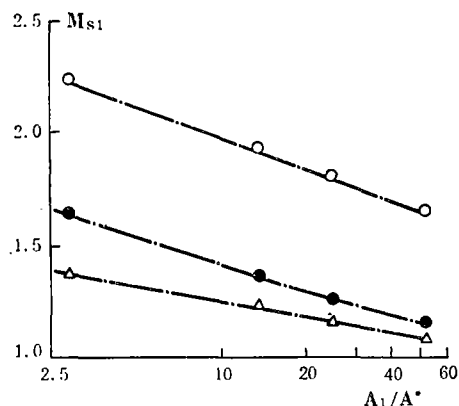


图 2 三种驱动压比时 M_{s1} 随 A_1/A^* 变化曲线
△ ● ○ 分别表示 $P_{41} = 13.5, 26.923, 158.219$

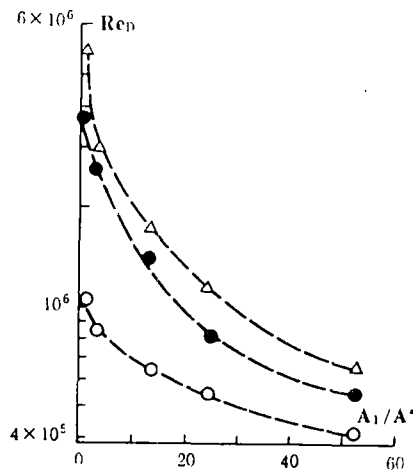


图 3 2 区雷诺数随面积比变化曲线
△ ● ○ 分别代表 $P_{41} = 13.5, 26.923, 158.219$

经观察可以发现增设孔板后, 在各种驱动压比下获得的 Re_D 数均比等截面激波管和扩张激波管时的雷诺数显著降低, Re_D 数随 A_1/A^* 呈反比规律变化。 $P_{41} = 158.219$, $A_1/A^* = 52.365$ 时, Re_D 数可降至 4×10^5 左右。 $P_{41} = 13.5$, $A_1/A^* = 52.365$ 时与等截

面激波管相比雷诺数降低了一个量级之多。可以想象,若进一步选用合适的膜片,并配合调整 $P_{4,1}$, 采用本方法获得更低的 2 区 Re_D 数实验状态是完全可能的。

观察主激波后 ΔP_2 曲线有助于了解 2 区实验气流状况。图 4 中给出一组典型的扩张激波管和增设孔板后的 ΔP_2 曲线。从图 4 中可以看到当 $A_1/A^* \leq 52.356$ 时, ΔP_2 曲线与扩张激波管曲线相似, 曲线基本平直表明增设孔板后 2 区流动仍保持均匀稳定。当 A_1/A^* 大于某一值后 (如 $A_1/A^* = 181.818$ 时), ΔP_2 曲线明显衰减, 这表明孔板开孔过小将影响 2 区实验气流品质。

激波管实验中达到预定要求的实验状态所需的驱动条件是主要关心的问题之一。由前面流动分析中给出的公式 (5) 可确定驱动状态与实验状态间的关系 (即 $P_{4,1}$ 与 $M_{s,1}$ 关系)。图 5 中给出了 $A_1/A^* = 13.624$ 时由 (5) 式计算的 $P_{4,1}$ 与 $M_{s,1}$ 曲线和实验结果。从中可以看到计算结果与实验值相符。

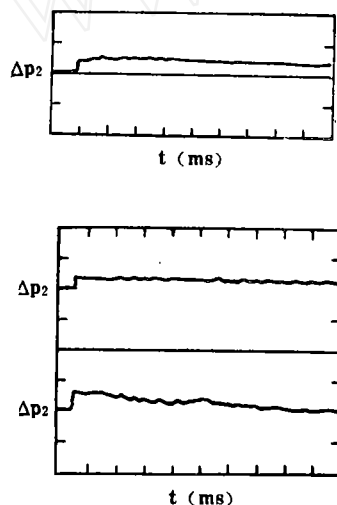


图 4 三种典型的 ΔP_2 曲线, (全程 10ms), 从上至下依次为扩张激波管、 $A_1/A^* = 52.356$, $A_1/A^* = 181.818$

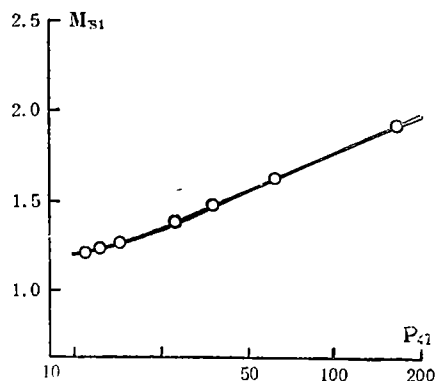


图 5 $A_1/A^* = 13.624$ 时, $P_{4,1} \sim M_{s,1}$ 曲线
○ 实验值 — (5) 式计算值

4 结 束 语

实验结果表明, 本文提出的在激波管夹膜处插入孔板的方法, 可以在与等截面激波管、扩张激波管具有相同驱动压力和驱动压比条件下获得更低强度的激波, 进而在大口径激波管中大幅度地降低了 2 区实验气流雷诺数 Re_D 。观察结果表明, 孔板开孔面积不太小时 2 区实验气流未受明显扰动, 开孔面积过小将影响 2 区气流品质。经实验验证公式 (5) 可用于预计增设孔板后激波管驱动状态与实验状态间关系。采用本方法可以有效地避免在大口径激波管中为降低雷诺数而选用超薄膜片带来的实验重复性差, 易掉膜等不利因素。本方法还具有加工简单操作方便的特点。

参 考 文 献

- 1 Lin S C, Fyfe W L. Phys Fluid 1961, 4: 238
- 2 Alpher P R, White D R. J. Fluid Mech 1958, 3 (2)
- 3 俞鸿儒, 林建民等. 空气动力学学报, 1984. 9 (3)
- 4 Shapiro A H. The dynamics and thermodynamics of Compressible fluid flow.

METHOD OF LOWERING REYNOLDS NUMBER IN SHOCK TUBE WITH LARGE INNER DIAMETER

Lin Jianmin Li Zhongfa Yu Hongru Li Zhenhua
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract A method is provided in the paper for lowering the Reynolds number of 2 region in shock tube with larger inner diameter. Using the method, Reynolds number can fall from $10^6 \sim 10^7$ in general to 10^5 order of magnitude. The experimental results show that the flow field of 2 region in shock tube does not be evidently interfered by employed the method. The relation between pressure ratio p_{41} and main Mach number M_{s1} is given and verified by experiments in the paper.

Key words shock wave, shock tube